

論文 高温下における高強度コンクリートの変形と劣化挙動

高野 智宏*¹・志村 和紀*²・堀口 敬*³・佐伯 昇*⁴

要旨：高温下における高強度コンクリートの挙動は普通強度のコンクリートとは異なり爆裂などの特異な現象が起こることが指摘されており¹⁾メカニズムの解明が必要とされている。本報告では高温下(600℃)における高強度コンクリートの変形と劣化挙動について検討を行ったものである。供試体は混和材の種類,混和材の量,含水率,水セメント比を変化させ耐熱性に与える影響を検討した。その結果,加熱すると溶融する混和材,低い水セメント比,含水率が高い供試体で内部温度上昇が緩和され,発生するひずみも減少する傾向にあり変形や劣化挙動にはコンクリート内部の水分の挙動が影響していると考えられる。

キーワード：高強度コンクリート, 温度特性, ポリプロピレン短繊維, ポリマービーズ

1. はじめに

高温下の普通強度コンクリート(JASS5では設計基準強度 36N/mm^2 以下)の劣化現象にはクラック,ポップアウト,スポーリング,などがあり豊富な研究実績がある。しかし,高強度コンクリート(JASS5では設計基準強度 36N/mm^2 以上)についての研究は少なく,配合や骨材の種類など異なる因子が多いため普通強度の研究実績をそのまま適用できないと言われている¹⁾。

高強度と普通強度コンクリートの劣化挙動の相違点として爆裂があげられる。火災時の高強度コンクリートは爆裂を起こしやすく,部材の性能低下をもたらすことが報告されている²⁾。通常,コンクリート中の水分が水蒸気になるとき高い気化熱を必要とし熱が奪われるため,コンクリート中の蒸発性の水分がなくなるまでコンクリートの内部温度はそれほど急激に上昇しない。ところが高強度コンクリートを急に加熱するとコンクリート内部に急な高水蒸気圧や表層部に急な熱応力,その他複合作用が発生し,高強度に伴う内部の高密度化の影響もあり爆裂が起こる

と推定され,高強度コンクリートは爆裂しやすいことが指摘されている³⁾。

本報告は高強度コンクリートの高温下における劣化挙動(本報告では変形と爆裂挙動)を把握する目的で,各種の配合因子(水セメント比,混和材の種類,混和材の混入率)と環境因子(含水率)が内部温度分布,熱拡散率,残存圧縮強度に及ぼす影響から劣化挙動を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の配合

使用した供試体の配合を表1に示す。配合は単位水量 $W=170\text{kg/m}^3$, $s/a=50\%$ を一定にした。水セメント比(以降W/Cと略す。)は0.25,0.45の2水準で高温下におけるW/Cの影響について検討を行った。混和材としてポリプロピレン短繊維(以降PPと略す。)とポリマービーズ(以降PBと略す。)を用いた。PPが混入された高強度コンクリートを加熱すると繊維が溶融し繊維が存在していたところに空隙が形成され,この空隙が熱応力および蒸気圧の緩和に寄与する

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 工修(正会員)

*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学 工博(正会員)

*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学 工博(正会員)

*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学 工博(正会員)

表1 供試体の配合

No	W (kg/m ³)	s/a (%)	W/C	混和材の種類	混和材の混入率 (%)	含水率 (%)	加熱前圧縮強度(MPa)
1	170	50	0.45	無	無	100	61
2	170	50	0.25	PB	0.25	45~55	94.3
3	170	50	0.25	PP	0.25	100	102.9
4	170	50	0.45	PP	0.25	0	67.5
5	170	50	0.45	PP	0.25	100	69.5

ため PP は爆裂防止に有効であると言われてい
る¹⁾。PP は混入量を増やすと適切な分散性が得
られ難くなるため本実験ではコンクリートに対
して 0.25vol/% を混入させた。同時に PP と同様
の効果が期待できる高分子独立気泡型の PB を
比較のため同容積混入し検討を行った。供試体
は打設後 1 日湿潤養生を行いその後、27 日水中
養生（養生温度 20 ± 2 °C）を行った。27 日水
中養生後コンクリートの含水率調整を行った。
含水率の調整評価方法として式 (1) を用いて行
った。

$$\frac{\text{(調整後重量-脱型時重量)}}{\text{(水中養生後重量(材齢28日)-脱型時重量)}} \times 100 (\%) \dots (1)$$

含水率 100% は 27 日養生後飽和の状態、45 ~
55% は 27 日養生後 2 日間で 80 °C の恒温炉で調
整した。また、0% は 28 日養生後 80 °C の恒温炉
で脱型後重量まで 3 日間程度で調整した。高温
加熱材齢は含水率 100% は 28 日、45 ~ 55% は 30
日、0% は 31 日である。

2.2 供試体の加熱条件

供試体を加熱する熱源
は図-1 に示すような電
気炉を使用し、電気炉内部
の温度を制御し実験を行
った。コンクリート内部
の結晶水は一般に温度が
約 100 °C でセメントペース

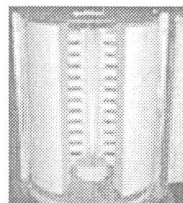


図-1 電気炉

ト中の自由水が蒸気になり始める。約 300 °C
に達するまでに、C-S-H の層間水、C-S-H、およびサ
ルフオアルミネート水和物の化学的結合水も一
部なくなる。さらに約 500 °C で水酸化カルシウ
ムが分解し始める³⁾。よって、実験では供試体を
加熱する温度を図-2 のように 10deg/sec の温度
上昇で 1 時間、その後 2 時間 600 °C を保持した後

に冷却するように炉内の温度（以降、炉内の温度
を周辺温度と呼ぶ。）を制御した。急激に冷却
は熱応力を発生し熱収縮によるクラックが発生
するため時間をかけゆっくりと冷却し冷却中に
起こる強度低下を防止することに努めた。

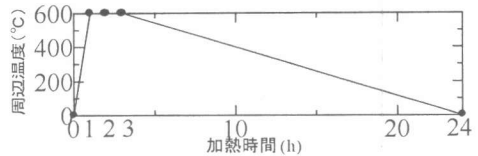


図-2 周辺温度履歴

2.3 供試体の内部温度測定と変位測定

供試体は φ 100 × 200mm の円柱供試体を用い
表-1 で示した供試体 No.1 ~ 5 について各 3 本
ずつ加熱した。加熱中の供試体内の内部温度は
供試体の表層部から中心部にかけて 10 mm おき
に K 型熱伝対を 4 本埋め込み表面から 1 番とし
計測を行った。実験結果より供試体内部の温度
分布から熱拡散率を差分法により式 (2) を用いて
算出した。加熱中の供試体変位は図-3 のよう
に供試体にステンレ

ス製リングを間隔
D=100mm で 2 つ固定
し、4 本のステンレス
製検出棒を炉外に出
し炉外でダイヤルゲ
ージを用い常温 (25

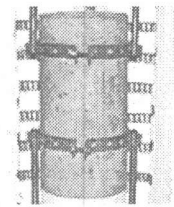


図-3 変位計測装置

$$k = \frac{(\Delta x)^2 \times \Delta T_2}{(T_1 - 2T_2 + T_3) \times \Delta t} \quad (m^2/hr) \dots (2)$$

k : 熱拡散率 (m²/hr)

Δx : 測定間距離 (0.0001 m)

ΔT₂ : 時間 t から (t + Δt) までに変化した時の
測点 2 の上昇温度 (°C)

T₁T₂T₃ : 時間 t における各測点温度 (°C)

Δt : 単位ステップ時間 (1/60 hr)

℃) から 100℃おきに 600℃まで 7 回計測した。加熱中の供試体の変位計測ではステンレス製検出棒の変位量と供試体の変位量をダイヤルゲージで検出するため、同じ加熱条件でステンレス製検出棒のみを加熱し変位量を予め計測しキャリブレーションを行った。加熱中の供試体変位量からステンレス製検出棒の変位量を引き補正を行い供試体のひずみを算出した (式 (3))。

$$x = \frac{\frac{(L1-I1)+(L2-I2)}{2} - \frac{(L3-I3)+(L4-I4)}{2}}{D} \dots(3)$$

- x : ひずみ
- L1,L2: 供試体上部変位量 (mm)
- L3,L4: 供試体下部変位量 (mm)
- I1,I2 : 上部ステンレス検出棒変位量 (mm)
- I3,I4 : 下部ステンレス検出棒変位量 (mm)
- D : 測定間隔 (100 mm)

2.4 残存圧縮強度率の算定

供試体は φ 100 × 200mm の円柱供試体を用い表 1 で示した供試体 No.1 ~ 5 について加熱前後の各 3 本圧縮試験を行った。残存圧縮強度率を式 (4) から算定した。

$$Z = H/S \times 100 (\%) \dots(4)$$

- Z: 残存圧縮強度率 (%)
- H: 加熱後圧縮強度平均値 (kgf)
- S: 加熱前圧縮強度平均値 (kgf)

3. 実験結果および考察

供試体の最高内部温度は各供試体で異なり、含水率と先にまとめると図 4 のようになる。No.4 の供試体のように特に含水率の低い供試体ほど内部の最高温度が高い傾向を示した。

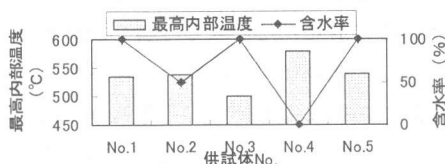


図 4 最高内部温度と含水率

図 5 からどの供試体も同様に供試体内部温度の上昇に伴い直線的にひずみが増加する傾向を示した。しかし、PB を使用した No.2 が各温

度におけるひずみが小さく温度ひずみの緩和に有効と考えられる。

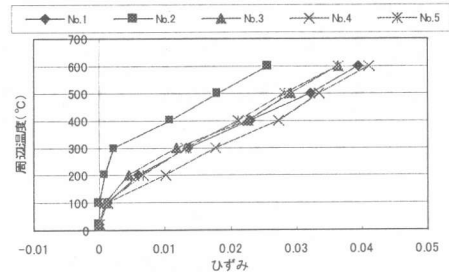


図 5 全供試体の各温度におけるひずみ

表 2 劣化状況と残存圧縮強度率

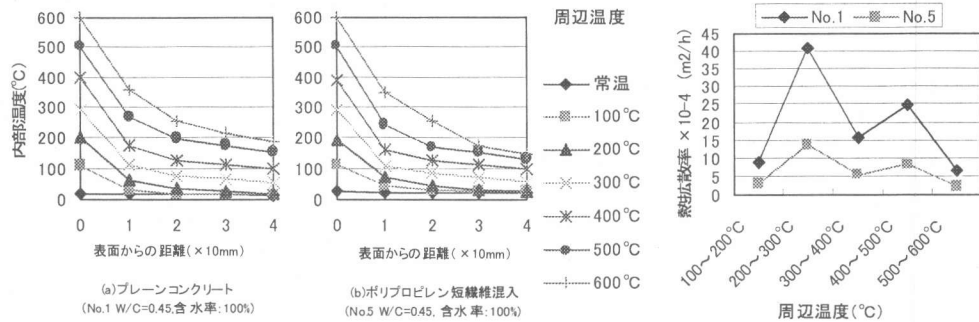
No	配合記号	残存圧縮強度(%)	表面クラック	爆裂
No.1	0.45-無-無-100	39.5		○
No.2	0.25-PB-0.25-45~100	50.9	○	
No.3	0.25-PP-0.25-100	55.6	○	
No.4	0.45-PP-0.25-0	32.5	○	
No.5	0.45-PP-0.25-100	49.6	○	

* 配合記号: W/C-混和材の種類-混和材の混入量(%)-含水率(%)

表 2 から No.1 の供試体のみで爆裂が発生し、他の供試体は表面にクラックが入った。爆裂した No.1 と No.5 の供試体を比較すると、混和材の有無のみで劣化形態や残存圧縮強度に大きな違いが見てとれる。よって、混和材の混入は爆裂に有効だと考えられる。No.4 と No.5 の供試体を比較すると、含水率が高い No.5 の供試体で残存圧縮強度が大きい値を示し、含水率が残存圧縮強度に影響を及ぼしていると考えられる。No.3 と No.5 の供試体を比較する。W/C が大きい No.3 の供試体で残存圧縮強度が高い値を示し、W/C が残存圧縮強度に影響を及ぼしていると考えられる。

3.1 ポリプロピレン短繊維の影響

図 6(A) 内部温度分布によれば PP を混入することで内部温度分布は周辺温度が 600℃の時、表面からの距離 40mm で低下する傾向が見られた。これは内部の PP が熔融することで空隙を形成し、コンクリート内部の水分が気化できる容積が増加し、発生した気化熱が多く温度上昇



(A) 内部温度分布

(B) 熱拡散率

図-6 ポリプロピレン短繊維の影響

を緩和したためと考えられる。(B)熱拡散率のグラフから、普通強度のコンクリートの熱拡散率は約 $30 \sim 40 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{h}$ で⁹⁾高強度コンクリートの方が小さい値を示した。これは、W/C による密度の影響が考えられる。W/C が大きい供試体はコンクリート中やペースト中の空げき量が多く、その空げきの影響で熱の伝わりが早く熱拡散率が大きくなると考えられる。No.1 プレーンコンクリートは周辺温度 200 ~ 300 °C で急激に熱拡散率が上昇した。これは空げき量が少ないうえに蒸気圧を低減できずコンクリート中の内圧が上がり内部温度も上昇したと考えられる。そのために爆裂が発生したと推測される。

繊維の有無に関係なく熱拡散率 M 型に変化している。これは周辺温度の状況からコンクリート内部の自由水と結晶水の脱水温度と類似し関係しているのではないかと考えられる。水は約 100 °C で水蒸気になり始めコンクリート中の自由水が最初に気化すると考えられる。内部温度が 100 °C に達するには周辺温度が約 300 °C の時でそれまでは温度が上昇し熱拡散率も大きくなると考えられる。その後、気化熱による温度上昇緩和効果が起こり熱拡散率が低下すると思われる。そして自由水が無くなるとまた温度が上昇し大きくなる。さらに、内部温度が約 300 °C つまり周辺温度が 500 °C に達すると結晶水 (C-S-H の層間水、C-S-H、サルフォアルミネート水和物の化学的結合水) が気化を始め温度の上昇が低下し熱拡散

率も低下したと考えられる。このことで熱拡散率が M 型に変化したと考えられる。No.1 の供試体は周辺温度が約 400 °C 近辺で爆裂が発生した。これはコンクリート内部温度が 100 ~ 200 °C で自由水が気化したため水蒸気が多く発生している状態と重なるのではないかと考えられる。

3.2 混和材の種類による影響

図-7 において両供試体共に W/C 0.25 であるが、含水率については PB を混入した供試体は 45 ~ 55%、PP を混入した供試体では 100% である。

(A) 内部温度分布によれば両供試体の含水率が異なっているために単純に比較はできないが、共に同様の傾向を示した。(B) 熱拡散率でも両供試体ともに同様な傾向を示し周辺温度が 300 °C 以上から一定の値を示した。これは内部温度が 300 °C に達せず結晶水は脱水されていないと思われる、図-6(B) 熱拡散率のような M 型にならなかったと考えられる。さらに W/C が小さい供試体は密度が高いため水分の蒸発性が遅いと考えられる。そのために、水分を保有し温度上昇が緩和され温度の上昇が遅く熱拡散率が一定になったと思われる。PP の方が熱拡散率は PB より小さい値を示したが、含水率の違いも考えられる。また、PB より PP の方が一つ一つの大きさが大きいため熱によって形成される空隙が大きく水分が気化する際の空隙量の増加量の違いが考えられるが、今後詳しい検討が必要である。

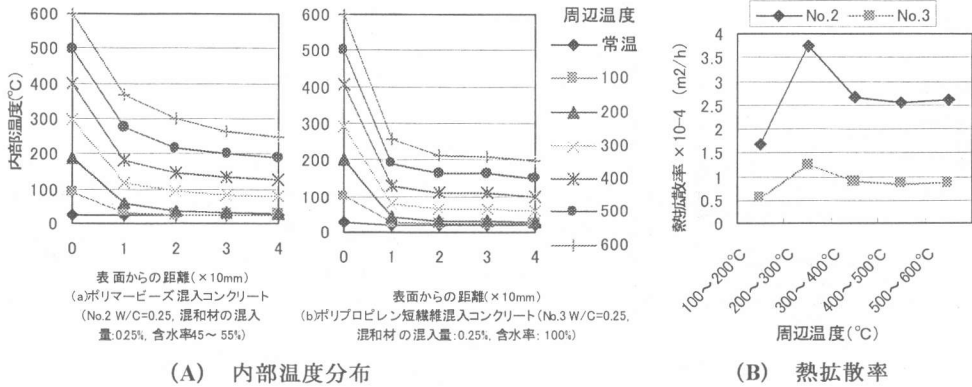


図-7 混和材の種類による影響

3.3 含水率の影響

図-8 (A) 内部温度分布によれば周辺温度が 100 ~ 200 °C の間では内部温度分布の差は見られず (B) 熱伝導率からも大きな差は見られないことから、含水率の影響は少ないと考えられる。これは内部温度分布で表面から距離 10mm 以上の深さの温度が両供試体とも 100 °C 以下であり、水分の蒸発による気化熱の影響が無いとと考えられる。No.4 の供試体で周辺温度が 300 ~ 400 °C, 500 ~ 600 °C の時に熱拡散率が大きくなった。これは No.4 の供試体に自由水が無い内部温度の上昇が大きく熱拡散率も周辺温度が 300 ~ 400 °C の時まで上がったと考えられる。周辺温度が 300 ~ 400 °C を越えると内部温度が 300 °C を越え結晶水 (C-S-H の層間水, C-S-H, サルフォアルミネート水和物の化学的結合水) が気化を始め温度上昇を抑制し熱拡散率も低下す

るがすぐに温度が上昇し熱拡散率も大きくなると考えられる。平均熱拡散率を見ると含水率 100 %の方が熱拡散率が小さい。これは気化熱が温度上昇を緩和したためだと考えられ、含水率が高い方で内部温度上昇緩和効果が認められた。このことから表 2 劣化状況と残存圧縮強度率で残存圧縮強度率にも差が見られたと考えられる。

3.4 水セメント比 (W/C) の影響

図-9 (A) 内部温度分布によれば、W/C 0.25 としたものは表層部 (表面から深さ 10mm) で深さ方向の温度勾配が大きく、温度上昇の緩和が認められ、それより深い部分では温度はほぼ一定となっている。一方、W/C 0.45 としたものは深さ 40mm まで温度の低下が認められる。(B) 熱拡散率でも異なる傾向を示した。これは、供試体密度の影響が考えられる。供試体密度は W/C 0.45

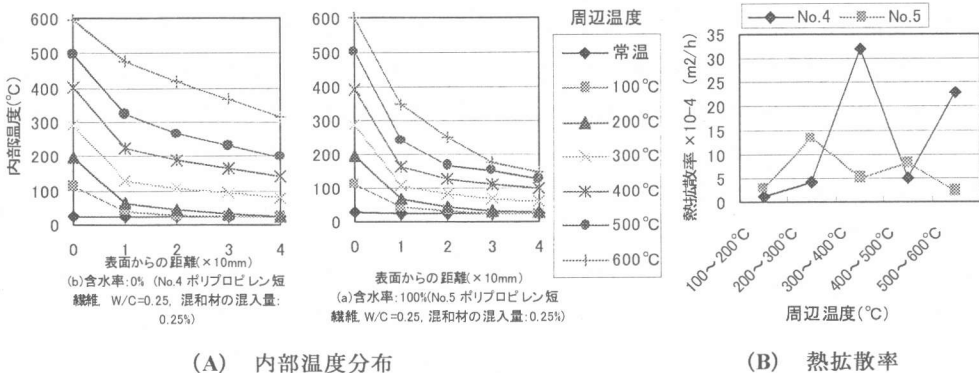


図-8 含水率が及ぼす影響

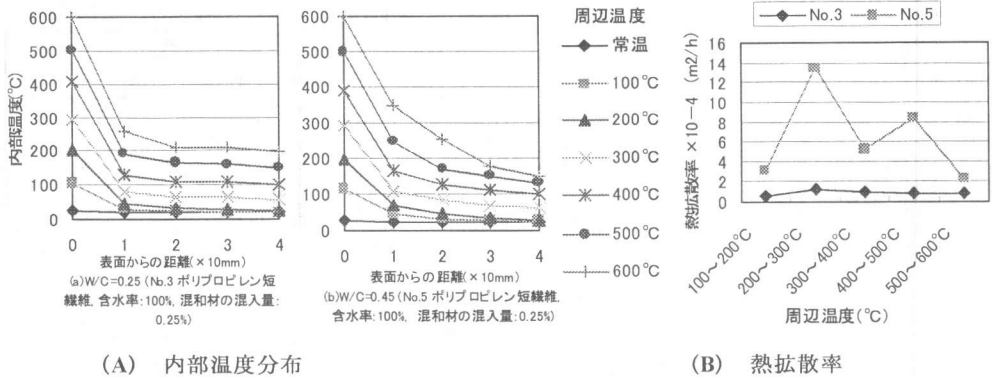


図-9 水セメント比が及ぼす影響

が約 1.994 g/cm^3 で W/C 0.25 は約 2.399 g/cm^3 であった。これは W/C が大きい供試体は密度が低いためにコンクリート中やペースト中の空隙量が多く熱の伝わりが早いことが考えられる。W/C が小さい供試体は密度が高いため空隙量が少なく水分の蒸発性が悪く水分を保有し温度上昇が緩和され、さらに PP が溶融し形成した空隙の影響で内圧が保たれ内部温度が一定に上昇し熱拡散率を小さくしたと考えられる。

熱拡散率の信頼性に関する考察を問う。

本報告で熱拡散率は差分法を用いて算出した(式(2))。差分式は3つの計測点から中心の計測点の熱拡散率を算出する。そのために、一定温度上昇で均等に温度が上がると式(2)の分母がきわめて0に近づき熱拡散率が大きくなる傾向にある。また3つの計測点温度の傾きが極端にきつい場合なども同様の傾向が起こる場合があり、このような測定点を増やす必要がある。また本実験で算出した熱拡散率のように(M型)角がある場合もより細かい計測が必要とされる。

しかし、全供試体の熱拡散率の挙動はコンクリート内の自由水と結晶水が気化する状況や、**3.1ポリプロピレン短繊維の影響**で述べたように劣化で唯一爆裂した No.1 の供試体の爆裂温度と熱拡散率から考えられるコンクリート内部の自由水の状況とも熱拡散率の増加傾向が似てため、本研究で差分法を用いて算出した熱拡散率は妥当かと思われる。

5. 結論

本実験の範囲内で次の事が言えると思われる。

- (1) ポリプロピレン短繊維とポリマービーズを混和材として混入した高強度コンクリートは無混入の高強度コンクリートより温度の割合を示す熱拡散率が小さくなり熱の伝達がしにくく、内部温度上昇を緩和し強度を残す傾向がある。
- (2) 高強度コンクリートにポリマービーズを混入すると温度上昇に伴うひずみが減少し強度低下を抑制する傾向がある。
- (3) 低い水セメント比のプレーンコンクリートは密度が高いため水分が蒸発しにくく、また熱拡散率も大きいことからコンクリート内の蒸気圧が高まり爆裂挙動を起こす傾向がある。

参考文献

- 1) 山崎 康行, 西田 朗: 耐爆裂性コンクリート, コンクリート工学, vol.36, No.1, pp.44-47, 1998.1
- 2) 井上 明人, 飛坂 基夫, 榊田 佳寛: 高強度コンクリートの耐火性能の評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.531-532, 1990.10
- 3) P.Kumar Mehta, Paulo J.M.Monteiro 共著 田澤 榮一, 佐伯 昇 監訳: コンクリート工学 微視構造と材料特性, 技報堂出版, pp.140-143, 1998.10
- 4) 土木学会: 平成8年制定 コンクリート標準示方書, 設計編, pp.25-26, 1996.3